



TITLE:

Infiltration process of brine in the deep crust constrained from multi-scale major and trace element zonings in high-grade metamorphic rocks(Digest_要約)

AUTHOR(S):

Higashino, Fumiko

CITATION:

Higashino, Fumiko. Infiltration process of brine in the deep crust constrained from multi-scale major and trace element zonings in high-grade metamorphic rocks. 京都大学, 2016, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19511>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-06-23に公開

学位申請論文要約

高度変成岩中の主要・微量元素によるマルチスケールゾーニングから制約する 大陸地殻深部における塩水流入過程

東野 文子

大陸地殻深部に存在する流体は、従来 CO_2 に富むとされてきた。しかし近年、天然試料中に塩水流体包有物や塩の結晶、塩素濃度の高い含水鉱物などが存在することから、大陸地殻深部における塩水に注目が集まっている (Van Reenen and Hollister, 1988; Kullerud, 1995; Markl and Bucher, 1998)。大陸地殻深部条件下では、 NaCl や KCl を高濃度で含む塩水は、 CO_2 に富む流体と共存でき、従来流体に溶けにくいとされてきた鉱物の溶解度を上昇させる。また、部分熔融を伴わずに、キロメートルスケールの大規模な物質移動を引き起こしうると考えられている (Ayers and Watson, 1991; Newton et al., 1998; Heinrich, 2007; Newton and Manning, 2010; Tropper et al., 2011; Harlov, 2012)。

塩素濃度が高い含水鉱物からは、流体中に存在した主要なカチオンが特定できない場合もあるため、流体包有物こそが変成作用時の流体の唯一の証拠であるとの議論も存在する (e.g., Van den Kerkhof et al., 2014)。しかし塩水は、 CO_2 に富む流体よりも粘性および濡れ角が小さく、流体包有物として岩石中に捕獲されにくい。さらに、変形の強い岩石中では、初期流体組成を保持した流体包有物のみが岩石中に捕獲されていることは少なく、多段階の流体包有物が混在することがある。そのため、流体包有物と変成作用と関連付けるのは難しい。一方、変形の強い岩石中であっても、包有物として存在した鉱物の変形や組成改変を免れた場合には、鉱物化学組成から当該鉱物形成に関与した流体の組成および時期を決定可能な場合もある。そのため、鉱物組成や微細組織を用いた塩水存在の指標を確立することは、変形の激しい大陸衝突帯地下深部における、塩水による物質移動の実態解明の重要な端緒となる。そこで本研究では、メルトよりも流体に取り込まれやすい元素の添加・溶脱と鉱物の組成ゾーニングに着目することで、鉱物微細組織と鉱物組成から塩水の存在を認識する指標を確立し、大陸地殻深部に存在した塩水の微量元素組成を制約することを試みた。

本論文では、全二章を通じて、東南極セール・ロンダーネ山地に産する、ザクロ石—斜方輝石—角閃石片麻岩の片麻状構造を高角に切って発達するザクロ石—角閃石脈と

その壁岩を含む試料を用いた。本試料の片麻状構造は、黒雲母の配列によって定義され、脈中にも壁岩から連続した配列が見られることから、脈の大部分は壁岩から形成されたといえる。ザクロ石—角閃石脈の中心から壁岩にかけて、角閃石および黒雲母の塩素濃度、および角閃石の K 濃度が減少する。また、斜長石の Na に富むリムの幅は脈から離れるにつれて薄くなる。こうした組織的特徴は、当該試料が下部～中部地殻条件下で NaCl-KCl 流体の移動に伴って形成されたことを示唆する。

第一章では、ザクロ石—角閃石脈の形成前後で、外部からの元素の添加・溶脱の有無を検討する際に必要な不動元素の選定を行った。脈からの距離に応じ、全岩 Zr 濃度および各構成鉱物の Zr 濃度を求めたところ、脈および壁岩ともにジルコンが最も主要な Zr のホスト鉱物であった。脈では Zr の 80% 以上、壁岩では約 95% がジルコン中に存在し、残りの Zr のホスト鉱物はザクロ石と角閃石であった。ザクロ石と角閃石中の Zr 濃度は脈からの距離に応じて変化しないことから、壁岩中の Zr はジルコンの挙動に左右される。ジルコンのリムの組成および年代値は、いずれも脈からの距離によらず一定であり、ジルコンは溶解や再成長した組織を呈さない。これらの観察から、壁岩において Zr は不動とみなすことができる。また、脈中においても最大 10% 程度の誤差に留意すれば、Zr を不動元素として扱うことが可能である。

第二章では、Zr を不動元素として用いることにより、脈と壁岩における元素の添加・溶脱を調べた。その結果、脈と直近の壁岩では、Li, Cu, Rb, Ba, Pb, U が添加されていた。これらの元素はメルトよりも流体に入って移動しやすいとされる。先に述べた角閃石、黒雲母、斜長石の組成と組織から、Na, K, Cl の流入が示唆されることと合わせ、本試料のザクロ石—角閃石脈は NaCl-KCl を含む塩水の流入によって形成されたと考えられる。

脈および壁岩に添加されたこれらの微量元素は、斜長石および燐灰石の粒子内でゾーニングを呈すると共に、脈からの距離とともに各鉱物中の濃度が減少する。各鉱物粒子中の濃度変化は、脈からの距離に応じた濃度変化よりも著しく小さい。そのため、各鉱物粒子内のゾーニングを無視したうえで、脈から離れるにつれて各鉱物中の微量元素濃度が減少し、一定値に近づく上あるいは下に凸の形のプロファイル（本研究では「拡散様」プロファイルと呼ぶ）を認識できる。これらの元素濃度が一定となる距離は鉱物種によらず、元素によって異なる。また、斜長石粒子内のゾーニングは、主要元素ではリムで不連続に主要元素濃度が変化する一方、微量元素では組成ギャップが無くほぼ平坦である。これは、斜長石のリムが界面溶解—再沈殿プロセスによって形成されたことを

示唆し、斜長石中の NaSi-CaAl 相互拡散係数が微量元素の結晶内拡散係数よりも 7-9 桁小さいことに起因する可能性がある。このような元素の違いによるゾーニングの違いに着目し、脈に流入した塩水が壁岩に組成変化をもたらすプロセスを検討した。本試料において塩水に含まれる元素は、塩水が壁岩へ浸透するにつれて、界面溶解—再沈殿プロセスによって再結晶した構成鉱物のリムに固定され、液相から分別したと考えられる。その後、結晶内拡散によって粒子内の微量元素組成が均質化したのであろう。斜長石 1 粒子中の微量元素組成が均質化するために要した時間は、700 °C における斜長石の Sr, Ba, Pb の結晶内拡散係数から見積もったところ、100 万年以内であった。この条件下では、斜長石中の Na はほとんど拡散しないことから、主要元素で見られるシャープなゾーニングが保たれていることと整合的である。

次に、既存の流体—鉱物間の元素分配係数を用いることで、脈に流入した塩水の微量元素濃度を見積もった。これを沈み込み帯深部で見積もられている流体の微量元素組成と比較した結果、用いた分配係数の温度圧力条件と本試料の温度圧力条件に差はあるものの、沈み込み帯で青色片岩がエクロジャイトに転移する場で放出される流体よりも、Ba, Pb, U 濃度が有意に高いことが分かった。従って、大陸地殻深部の塩水は、これらの元素に富む中部～上部地殻の形成に寄与し得る。

本試料において、主要元素によるシャープなゾーニングで認識されるリムを持つ斜長石と、塩素濃度の高い角閃石または黒雲母がともに出現する領域は、塩水が粒界に存在した範囲を示すと考えられる。そこで本研究では、この組織を新たな塩水活動の痕跡の指標とすることを提案する。本指標の活用により、塩水の主たる通り道を特定することが困難であったり、流体包有物の痕跡の少ない天然試料においても、塩水流入の可能性を議論することが可能となり、大陸地殻深部における物質移動の理解が進むと期待される。